

DOI: 10.7667/PSPC201725

交流不对称故障下的 LCC-MMC 混合直流系统 输送功率提升策略研究

时伯年¹, 洪潮², 孙刚¹, 张野², 杨健²

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要: 将常规两端直流输电系统逆变站的电网换相换流器(LCC) 替换为模块化多电平换流器(MMC)所构成的混合直流输电系统, 可结合两种换流器的优点而具有广阔的应用前景。在研究其基本稳态控制特性的基础上, 重点分析了交流电网不对称故障引起的直流输送功率下降及中断问题。通过分析混合直流系统的交流故障特征, 发现交流不对称故障发生在整流侧时易引起直流电压下降甚至输送功率的中断, 发生在逆变侧时易引起直流系统电压异常。鉴于此, 提出了基于 MMC 典型控制的附加直流电压控制策略, 在其调制范围内通过降低故障时逆变侧的参考直流电压以提高直流系统的输送能力。若检测到本站直流电压的交流分量大小超过限定值, 则附加控制策略自动投入, 无需依靠换流站间的通信。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真验证了所提控制策略的可行性。

关键词: 混合直流输电系统; 交流不对称故障; 调制比; 附加直流电压控制; 功率提升

Research on power transmission enhancement strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under AC symmetric fault

SHI Bonian¹, HONG Chao², SUN Gang¹, ZHANG Ye², YANG Jian²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The hybrid HVDC system, which adopts line commutated converter in rectifier side, and modular multilevel converter in inverter side, can combine the advantages of the two converters and has broad application prospects. Based on the study of the basic steady-state operation control characteristics, the DC transmission power drop and the interruption problem caused by the asymmetric fault of the AC power network are analyzed emphatically on the basis of the LCC-MMC hybrid HVDC transmission system. And the AC fault characteristics of the hybrid HVDC system are analyzed. It is found that the DC voltage drop caused by the asymmetrical fault is most likely to cause the interruption of the transmission power at the rectifier side, and cause the voltage anomaly at the inverter side. A supplementary DC voltage control strategy based on MMC typical control is proposed to improve the transmission capacity of the DC system by reducing the reference DC voltage of the inverter in the modulation range. If it is detected that the inverter side DC component of the DC voltage exceeds the limit value, the additional control strategy is automatically input, without relying on the communication between the converter stations. Finally, the feasibility of the proposed control strategy is verified by PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation.

Key words: hybrid HVDC system; AC symmetric fault; modulation ratio; supplementary DC voltage control; power boost

0 引言

高压直流输电系统可分为基于晶闸管技术的常规直流输电系统 (LCC-HVDC) 和基于全控型电力电子器件技术的柔性直流输电系统 (VSC-HVDC)。其

中, 常规直流输电系统输送容量大、成本低、损耗小、运行技术成熟, 但存在逆变侧易发生换相失败、对交流系统的依赖性强、需吸收大量无功和换流站占地面积大等缺点。而柔性直流输电系统则具有能够实现有功功率及无功功率解耦控制、可以向无源网络供电、

结构紧凑占地面积小和不存在逆变侧换相失败问题等优点,但其成本高昂、损耗较大。因此结合常规直流和柔性直流的混合直流输电系统将具有很好的工程应用前景^[1-5]。这两种系统结合了常规直流输电损耗小、运行技术成熟以及柔性直流输电可以向无源网络供电、不会发生换相失败^[6]的优点。

文献[7]提出了 LCC-MMC 拓扑结构的混合直流输电系统,并阐述了基本控制策略及其优缺点;文献[8]提出的附加直流电压控制策略为直流输电的电压控制策略提供了新思路;文献[9-10]进一步介绍了该拓扑结构的控制运行特征,并提出了 C-MMC 和 FH-MMC 等混合拓扑,旨在实现直流故障的自清除等功能;文献[11-12]阐述了交流系统故障时直流系统的控制穿越策略,但其控制策略启动条件未作详细描述。

本文以 LCC-MMC 混合直流系统为研究对象,其中逆变侧 MMC 采用应用广泛的半桥式换流器。但这种拓扑结构可能面临的问题是交流系统故障后,交流电压跌落会影响直流电压的稳定,造成功率输送减小甚至中断,对受端系统造成较大冲击。本文在研究直流系统基本稳态运行控制特性的基础上,重点分析了交流电网不对称故障引起的直流输送功率下降及中断问题。对基于 MMC 典型控制的附加直流电压控制策略,在其调制范围内通过降低故障时逆变侧的参考直流电压以提高直流系统的输送能力,并通过检测本站直流电压中交流分量大小,作为该附加控制策略的切换使能信号。该控制策略的优点是无需依靠换流站间通信即可实现控制模式的自动切换。最后,通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真验证了所提控制策略的可行性。

1 系统拓扑结构

LCC-MMC 混合直流输电系统中:整流侧采用 12 脉动电网换相换流站(LCC),每极一个 6 脉动换流器,直流侧中性点接地;逆变侧采用半桥式模块化多电平换流站(HB-MMC)的结构形式,换流变压器采用星三角接线且阀侧经大电阻接地的方式,以防止交流系统故障零序分量传递。拓扑结构如图 1 所示,关键参数如表 1 所示。

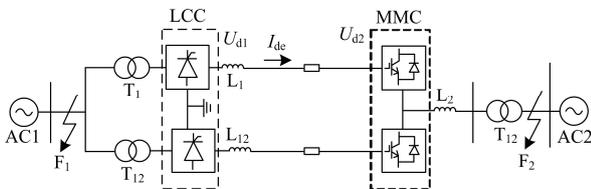


图 1 LCC-MMC 混合直流输电系统拓扑图

Fig. 1 Topological graph of LCC-MMC hybrid HVDC system

表 1 LCC-MMC 混合直流系统参数

Table 1 System parameters of LCC-MMC hybrid HVDC		
	整流站 LCC 参数	逆变站 MMC 参数
交流侧额定电压	525 kV	525 kV
额定直流电压	320 kV	320 kV
额定容量	500 MW	500 MW
换流站结构	12 脉动换流单元	每桥臂 400 个子模块
柔直桥臂电抗器	—	60 mH
柔直子模块电容	—	24 000 μ F

2 系统建模及基本控制策略

2.1 数学模型

12 脉动的 LCC 整流站其直流电压数学模型可表示为^[1]

$$U_{d1} = 2.7U_1 \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{r1} I_{dc} \quad (1)$$

逆变站采用模块化多电平换流器 MMC,其数学模型表示为^[2]

$$\begin{cases} u_k - v_k = L_b \frac{di_k}{dt} + R_b i_k \\ v_k = (u_{nk} - u_{pk}) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,MMC 调制比定义为

$$m = \frac{2v_m}{U_{d2}} \quad (3)$$

换流站间直流电流 I_{dc} 表示为

$$I_{dc} = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R_{dc}} \quad (4)$$

式中:变压器阀侧空载线电压有效值为 U_1 ; 换相电抗为 X_{r1} ; 触发角为 α ; 直流电流为 I_{dc} ; u_k 表示阀侧 $k(k = a, b, c)$ 相电压; i_k 表示阀侧 k 相电流; u_{pk} 、 u_{nk} 分别为 k 相上下桥臂子模块电容电压和; L_b 表示桥臂电抗电感值的一半; R_b 表示桥臂电阻值的一半; m 表示调制比; v_m 表示阀侧三相调制相电压峰值。

2.2 基本控制策略

LCC-MMC 混合直流系统的基本控制策略为:整流站 LCC 采用定直流电流、最小触发角控制和低压限流控制^[13]。逆变站 MMC 配置有定直流电压和后备定直流电流、附加直流电压控制^[14]。正常运行时,整流站工作于定直流电流控制,逆变站采用定直流电压控制,控制策略如图 2 所示。

由于逆变侧 MMC 没有换相失败的问题,这里低压限流控制的作用是在整流侧交流系统发生干扰或故障时,有利于交流电压的恢复,避免交流电压不稳定。该策略继承了常规直流系统整流站成熟的

是通过修正直流电压参考值,使混合直流系统在整流站交流侧故障引起直流电流骤降时,降低逆变站直流电压参考,从而使混合直流系统最大限度地传输有功功率。

附加直流电压控制模块的使能信号是通过就地监视 MMC 正负极直流电流中 100 Hz 分量的幅值大小,判断是否启用该控制模块。

直流电流 100 Hz 保护原理如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_{dc_P_100\text{Hz}} > I_{set} \text{ 或} \\ I_{dc_N_100\text{Hz}} > I_{set} \\ I_{set} = k_1 I_{dc_PN} + k_2 I_{dc_P} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $I_{dc_P_100\text{Hz}}$ 和 $I_{dc_N_100\text{Hz}}$ 为提取的直流电流 100 Hz 分量; I_{dc_PN} 和 I_{dc_P} 为直流额定电流和实际电流值; k_1 和 k_2 为保护系数,均可取 0.03; 用于控制策略切换的保护动作延时可取 10 ms。

逆变侧交流系统故障时,由于交流电压降低,MMC 的调制特性受到影响,调制比的直接控制难度加大,故上述附加直流电压控制模块不适于该故障类型。此时,逆变侧 MMC 应充分发挥其直流电压调节能力,最大限度吸收直流功率,整流侧 LCC 适当增大触发角,降低输送功率。

4 仿真验证

按图 1 所示的拓扑结构在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建 LCC-MMC 混合直流系统仿真模型。为验证所提直流控制策略的可行性,以下故障仿真验证暂不考虑交流保护动作和断路器重合闸的影响。

4.1 整流侧故障

设置整流站交流系统 B 相不对称接地故障,接地电阻 15 Ω ,故障持续 1 s,传输功率为额定值 500 MW。当整流站检测到交流电压降低后,立即切换至最小触发角控制模式,触发角逐渐减至最小限制角。由于交流侧不对称所引起的负序分量会通过换流器进入直流侧,逆变站 MMC 端口也将检测到该交流分量。

如图 4 所示:故障导致直流电流中含有二倍频分量大于保护整定值,导致直流电流 100 Hz 保护启动;逆变站 MMC 切换至附加直流电压控制模式,参考调制比最大可取 $m_{ref} = 1$ 。

对比附加直流电压控制器投入前后的仿真波形,如图 5 所示。从仿真图中可见: B 相电压跌落深度约 30%;在该控制策略下,逆变侧直流电压降低,换流站间直流电压差增大,故障损失的直流传输功率明显减小。

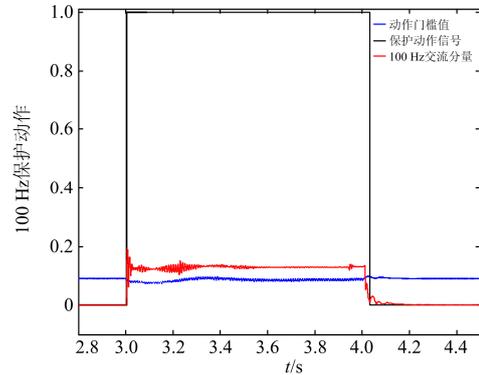


图 4 MMC 站 100 Hz 保护波形图

Fig. 4 Simulation waveform of 100 Hz protection in MMC

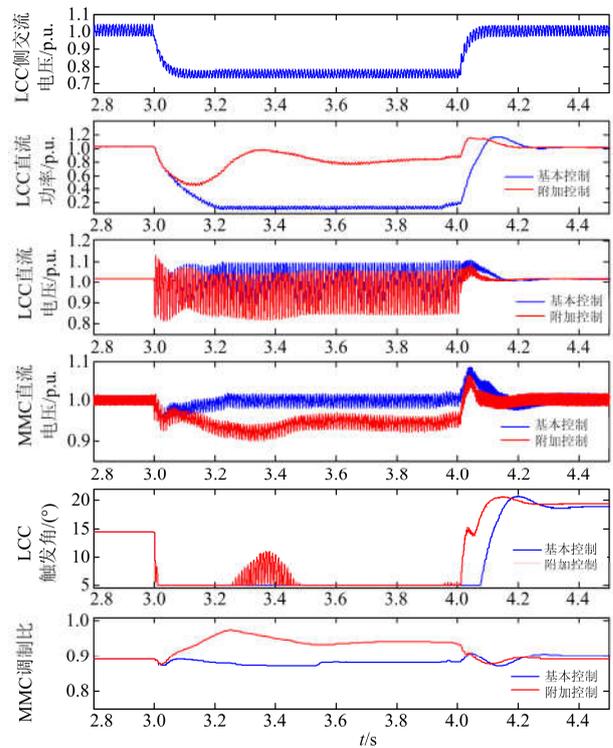


图 5 整流侧交流 B 相故障仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of rectifier side B phase fault

4.2 逆变侧故障

设置逆变站交流系统的 BC 相间故障,接地电阻 20 Ω ,故障持续 1 s,传输功率为额定值 500 MW。由于 MMC 控制器配置有负序电流抑制环节,交流侧不对称所引起的负序分量不会通过换流器进入直流线路侧,逆变站 MMC 端口不会检测到该交流分量,因此直流电流 100 Hz 保护不会动作,控制策略不发生切换。

从仿真图 6 中可见,BC 相电压因故障而引起交流电压幅值的跌落,向逆变侧交流系统传输的功率降低。此时,MMC 充分发挥其直流电压的调节

能力并向交流电网提供无功支持。因系统输入和输出有功功率的不均衡会向 MMC 子模块电容充电, 导致系统的直流电压升高。

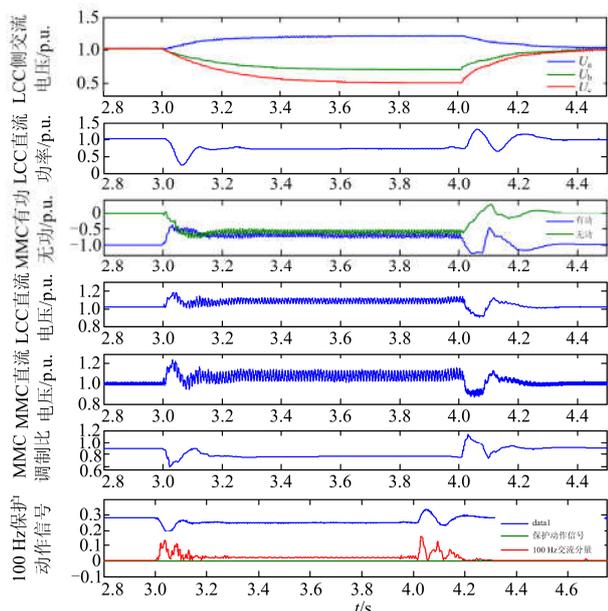


图 6 逆变侧交流 BC 相故障仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of inverter side BC phase-to-phase fault

5 结论

本文在研究 LCC-MMC 混合直流系统基本稳态运行控制特性的基础上, 提出基于 MMC 典型控制的附加直流电压控制策略, 并通过 PSCAD/EMTDC 平台进行了仿真验证, 结论如下。

1) 研究了交流电网不对称故障引起直流输送功率下降及中断问题, 并讨论了混合直流系统的交流故障特征。发现: 整流侧交流不对称故障引起的直流电压下降最有可能导致输送功率的中断; 逆变侧交流故障容易引起直流系统过电压。

2) 所提附加直流电压控制策略核心是在 MMC 不发生调制的前提下, 减小直流电压的参考值。通过降低逆变侧直流电压提高故障时的直流输送功率及过电压发生的概率。

3) 该控制策略通过改进原有 100 Hz 保护定值的方法作为控制模式切换的判据, 无需换流站间的通信即可实现换流站控制模式的自动切换, 实现较方便。

参考文献

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
[2] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社,

2014.
[3] MANOHAR P, KELAMANE V, KAUSHIK D, et al. Improved controls for LCC-VSC hybrid HVDC system[C] // Proceedings of 2013 International Conference on Circuits, Controls and Communications, December 27-28, 2013. Bengaluru, India: 5p.
[4] NAMI A, LIANG J, DIJKHUIZEN F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 385-394.
[5] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-85.
SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 75-85.
[6] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
[7] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-311.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-311.
[8] 李海峰, 刘崇茹, 李庚银, 等. 模块化多电平换流器附加直流电压控制策略设计[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1779-1785.
LI Haifeng, LIU Chongru, LI Gengyin, et al. Design of additional DC voltage control strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1779-1785.
[9] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
[10] 李少华, 王秀丽, 彭忠, 等. LCC 型双端直流中引出并联 FB-MMC 功率分支站的混合型多端直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 41(9): 2795-2803.
LI Shaohua, WANG Xiuli, PENG Zhong, et al. Hybrid multi-terminal integration of parallel FB-MMC tapping station into LCC-HVDC transmission link[J]. Power

- System Technology, 2016, 41(9): 2795-2803.
- [11] 薛英林, 葛风雷, 赵峥, 等. LCC-C-MMC 混合高压直流系统直流低电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 42(1): 85-96.
XUE Yinglin, GE Fenglei, ZHAO Zheng, et al. DC low-voltage ride-through control strategy of LCC-C-MMC hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 42(1): 85-96.
- [12] 刘志超, 时伯年, 刘斌, 等. 基于最大调制比的混合直流系统交流侧故障控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 125-130.
LIU Zhichao, SHI Bonian, LIU Bin, et al. Control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC transmission under AC system fault based on maximum modulation index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 125-130.
- [13] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 33(17): 4345-4351.
GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 33(17): 4345-4351.
- [14] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.
XIONG Lingfei, HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.
- [15] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江 ± 800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ± 800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [16] 徐海军, 阮思焜, 吕鹏飞. 高岭背靠背直流 50 Hz 和 100 Hz 保护动作分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 54-57.
XU Haijun, RUAN Siye, LÜ Pengfei. Study of 50 Hz and 100 Hz protection in Gaoling back-to-back HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 54-57.
- [17] 王磊, 李兴源, 李宽, 等. 伪双极 LCC-VSC 型混合高压直流输电系统向无源网络供电的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 27-33.
WANG Lei, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Research of pseudo bipolar LCC-VSC hybrid HVDC system supplying passive network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 27-33.
- [18] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 基于 CSC 和 VSC 的混合多端直流输电系统及其仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 32-36, 76.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Simulation study for a hybrid multi-terminal HVDC system based on VSC and CSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 32-36, 76.

收稿日期: 2017-02-24; 修回日期: 2017-07-07

作者简介:

时伯年(1976—), 男, 博士, 高工, 研究方向为交直流电力系统分析与稳定控制等; E-mail: shibonian@sf-auto.com

洪潮(1967—), 男, 博士, 教授级高工, 从事交直流混联电力系统仿真分析、运行与控制, 直流输电工程仿真、试验和调试技术等研究; E-mail: hongchao@csg.cn

孙刚(1986—), 男, 硕士, 研究方向为柔性直流控制保护技术等。E-mail: sungang@sf-auto.com

(编辑 葛艳娜)